干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j. issn. 1000 - 6060. 2019. 02. 06

宁夏一次春季突发寒潮极值暴雪过程的等熵位涡分析①

胡亮帆[1]， 胡文东[1,2,3]， 谷思雨[1]， 王 蕾[1,4]， 王金兰[5]

（1 成都信息工程大学 大气科学学院,四川 成都 610225； 2 软件自动生成与智能服务四川省重点实验室,四川 成都 610225； 3 高原大气与环境四川省重点实验室,四川 成都 610225； 4 黑龙江省气象服务中心,黑龙江 哈尔滨 150030； 5 河南省新乡市气象局,河南 新乡 453000.）

摘 要: 利用常规观测、地面加密站逐时观测和欧洲中期数值预报中心 0.125 °×0.125 °逐 6 h 再分析资料,从天气系统演变、冷空气路径、灾害性天气预报指标等方面,利用 315 K 等熵位涡对 2016 年 4 月 2 ~3 日宁夏突发寒潮极值暴雪过程进行了诊断分析。结果表明:(1)此次过程属于高空小槽东移合并型,地面有冷高压分裂且主体快速南下,并有锋面相配合,导致强冷空气入侵和锋后降雪。(2)前期环流形势稳定,后期天气系统突变,常规气象资料难以预报,315 K 等熵位涡图可作为短时、局地的春季寒潮降雪过程的有效分析和预报工具。(3)等熵位涡清楚地示踪冷空气的来源和传播路径:咸海区域对流层顶冷空气东移南扩与青藏高原对流层中层冷空气合并加强,且新地岛平流层下部的冷空气在前期缓慢东移后,自贝加尔湖加速南下对其补充引发寒潮。(4)等熵位涡异常大值可定量、清晰地表述关键影响系统西风带小槽的演变,具有更好的指示意义。(5)等熵位涡高值区随时间变化与寒潮演变一致,可提前 6 h 指示冷空气活动,且等熵位涡大于 1.0 PVU 区域与寒潮及降雪落区一致,大于 0.8 PVU 区域与强降温区域一致,可作为精细定量预报的重要指标。

关 键 词: 宁夏; 寒潮暴雪; 等熵位涡; 机制分析; 预报指标

文章编号: 1000 - 6060(2019)02 - 0271 - 09(0271 ~0279)

位涡综合表征了大气的热力、动力特征,其理论被广泛应用于天气研究。1985 年,HOSKINS 等[1]提出等熵位涡（Isentropic Potential Vorticity,IPV）分析方法。该理论因既能描述气块轨迹,又能有效显示大尺度运动的动力学性质而应用广泛[2]。近年来,赵其庚[3]用 IPV 揭示了冷空气的三维结构、性质和影响范围,表明 IPV 图是分析大尺度天气过程的有效工具。丁一汇等[4]指出根据 IPV 的守恒性可追踪冬季寒潮过程。黎惠金等[5]用 IPV 理论分析 2008 年南方低温冰冻天气,揭示强冷空气在不同阶段的不同来源。陶祖钰等[6]指出 IPV 不仅反映极地气团的活动,同时综合反映锋、急流、对流层顶。吴志彦等[7]利用 IPV 分析了寒潮的酝酿和爆发。

现有研究主要集中在大范围的较强寒潮,侧重于冬季,且冷空气相对明显,过程发展稳定、持续性好、预报时效性强。本文针对突发性、局地性与灾害性强、持续时间较短(12 h 左右)的春季寒潮暴雪过程,探讨在此背景下 IPV 的过程分析能力,及其与关键时间节点和灾害落区之间的关系。

宁夏回族自治区地处黄土高原西北部边缘,其东、西、北三面均与沙漠毗邻[8]。宁夏北部年平均气温在 5.6 ~ 12.1 ℃之间,年降水量 160 ~ 340 mm[9],属于干旱气候区,也是典型的生态环境脆弱区和气候变化敏感区[10],极易受灾害性天气影响,其中春季寒潮型暴雪天气是最严重的灾害性天气之一,常伴有大风、沙尘、强降温,给自然生态、工农业

① 收稿日期: 2018 - 10 - 20; 修订日期: 2019 - 01 - 19
基金项目: 国家自然科学基金重点项目(91644226);四川省应用基础研究重点项目(2018JY0056);科技部公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206005);中国气象局成都信息工程大学气象软件工程联合研究中心项目(2016102)
作者简介: 胡亮帆(1989 -),女,硕士研究生,主要从事灾害性天气研究. E-mail: huliangfan@ 126. com
通讯作者: 胡文东(1966 -),男,教授. E-mail: huwendong@ cuit. edu. cn

生产、交通运输与社会运行等带来严重危害，造成巨大经济损失[11-12]；同时也有助于改善空气质量、提高农田底墒，深入研究此类过程具有学术价值和社会现实意义。

选取2016年4月宁夏一次春季突发寒潮极值暴雪过程，在影响系统相对较弱、前期环流形势稳定、后期天气系统突变的情况下，利用等熵位涡IPV，对天气系统演变、冷空气的来源与传播路径、寒潮暴雪天气的发生与落区进行分析，以揭示此事件的发生、发展机制，为增强预报能力提供参考依据，进一步提高西北干旱气候下生态脆弱区的气象防灾减灾水平。

1 资料与方法

1.1 资料

所用资料为地面及探空观测资料、宁夏区域自动气象站观测资料和欧洲中期数值天气预报中心ECMWF(ERA-interim)逐6 h再分析资料，垂直分辨率21层，水平分辨率为0.125°×0.125°，包含位势高度、风、温度等要素。

1.2 IPV的性质与计算

等熵位涡IPV不仅在绝热无摩擦的大气中守恒，即使有非绝热加热或摩擦和动力波拖曳的非守恒效应存在时，IPV依然适用[6]。本次天气过程中存在较强的非绝热加热作用，因此选用IPV更具适用性。

IPV是在等位温面(等熵面)上分析等位涡线，其垂直分量的表达式为：

$$V_P=(\zeta_\theta+f)\left(-g\frac{\partial\theta}{\partial p}\right) \quad (1)$$

式中：g为重力加速度，ζ_θ为等熵面上相对涡度的垂直分量，f为地转涡度的垂直分量，$-(\partial\theta/\partial p)$为静力稳定度。单位：1 PVU = 10^{-6} $m^2 \cdot K \cdot s^{-1} \cdot kg^{-1}$。

2 天气实况与环流形势

2.1 天气概况

2016年4月2日11时至3日08时，宁夏出现了一次寒潮降雪天气过程，并伴有6级以上大风，过程后出现道路结冰以及大雾等灾害。宁夏自北向南出现大范围降温，最大降温幅度出现在青铜峡为11.6 ℃，其中宁夏北部达到寒潮标准，海原等站达到强降温灾害标准(图1a)。

山脉的背风区常是极端降雪的主要集中区域[13]，宁夏北部的贺兰山东侧也有同样的特征[14]。此次降雪天气主要发生在贺兰山背风区(图1b)，其中最强降雪中心位于贺兰，降雪量高达20.4 mm，创该站日最大降雪量极值；银川、陶乐、平罗降雪量分别为12.2、11.1、7.9 mm，创4月的日最大降雪量极

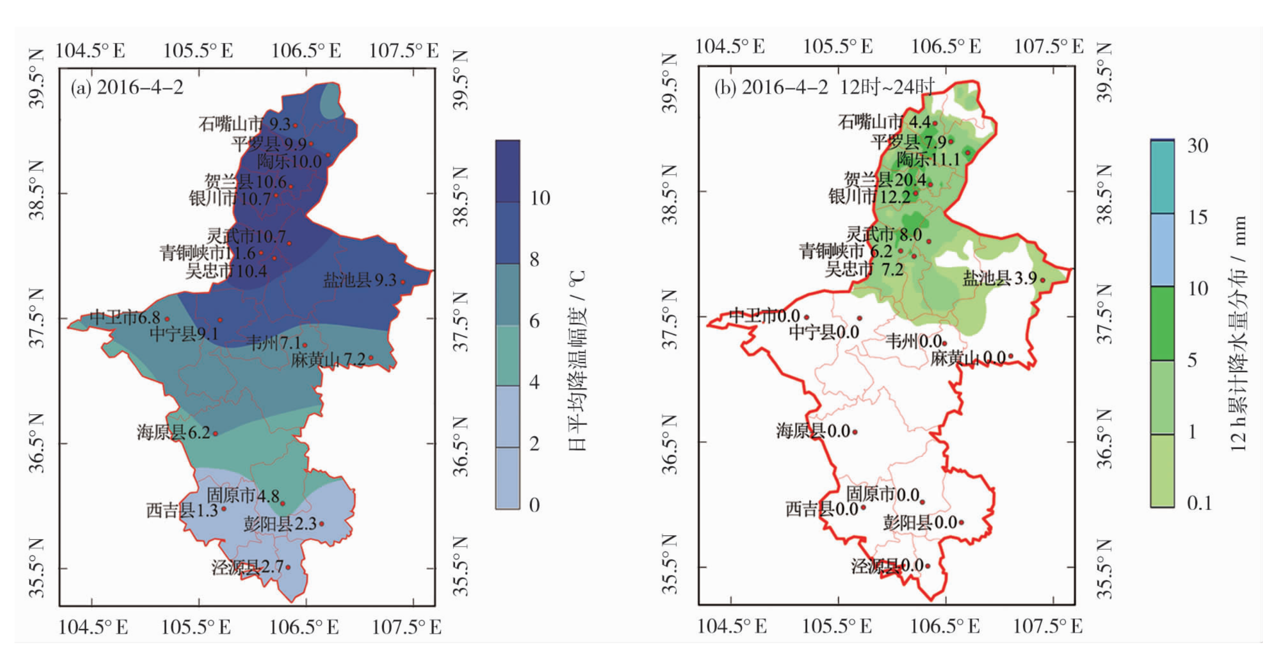


图1 寒潮降雪过程天气实况

Fig.1 Real weather of cold wave and snowfall process. (a. Average temperature drop range distribution, unit: ℃; b. Distribution of 12 h accumulated precipitation, unit: mm)

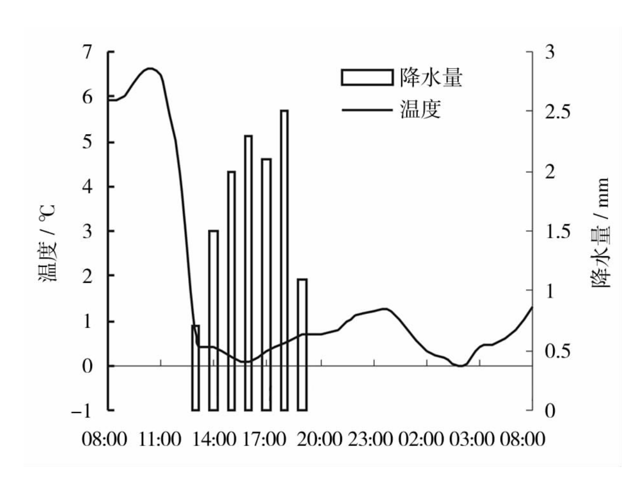


图 2　2016 年 4 月 2 日 08 时 ~3 日 08 时银川站逐时气温和降水量变化

Fig. 2　Temporal evolution of observed hourly air temperature and precipitation at Yinchuan station from 2 to 3 April 2016

值。3 日 08 时,贺兰积雪深度达 6.0 cm,其他站普遍 1 ~3 cm。降水呈单峰型(图 2), 2 日 13 时 ~20 时为主要降水强度时段,2 日 20 时 ~3 日 00 时,过程趋于结束,仅宁夏中东部个别站点有微到小雪。

3 日 06 时,平罗、沙湖、盐池、麻黄山等地出现能见度小于 200 m 的雾,大武口、海原等地出现能见度小于 500 m 的雾。此次寒潮降雪及伴随的道路结冰、大雾等天气给人们的生活和出行带来不便,造成银川河东国际机场 20 余次航班延误、数千名旅客滞留,高速公路部分路段双向交通管制,市区道路剐蹭事故增多,农业设施被积雪压塌等,直接经济损失数千万元。

2.2　环流形势演变

过程前期,1 日 20 时 500 hPa(图略),欧亚范围

图 3　2016 年 4 月 2 日 08 时高度场(单位:dagpm)、温度场(单位:℃)和风矢量场(单位:m · s⁻¹)及过程期间地面冷高压与冷锋演变图

Fig. 3　Observed geopotential height(unit: dagpm), temperature(unit: ℃) and wind field (unit: m · s⁻¹) at 08:00 on 2 April 2016 and the location of surface cold high pressure and cold front

内“两槽一脊”环流型稳定持续，各系统移动平缓。西西伯利亚至新疆北部为高压脊，引导冷空气在贝加尔湖附近堆积。

2 日 08 时寒潮酝酿阶段，500 hPa(图 3a)东北低涡延伸出的槽进一步东移发展，槽后冷空气增强南下。河西走廊南北两侧各有一个低槽，形成波列[15]或赶槽[16]。其中北侧槽尺度小、移速快，将并入东南侧的槽，从而加强冷空气的强度。此时锋区强度为 16 ℃·(5 纬距)$^{-1}$，位于 40°～42°N。700 hPa(图 3b)，冷涡后的偏北干冷气流与南支槽前的偏南暖湿气流在宁夏北部交汇。辐合线与高空急流的耦合作用有利于增强锋面次级环流上升支，为降雪提供有利的动力抬升条件和水汽条件。850 hPa(图 3c)0 ℃线快速南压至 40 °N，宁夏上空转为东北急流控制，冷平流向南输送显著，同时河套回流向宁夏输送来自渤海湾的水汽。

地面观测资料表明，1 日 08 时～2 日 08 时(图 3d)，地面冷高压处在宁夏寒潮关键区(40 °～55 °N，90 °～110 °E)[14]内增强至 1 042.5 hPa 且缓慢南压，宁夏位于冷高压前缘，仍为暖区控制。14 时，冷高压分裂且主体快速南压[8 纬距·(3 h)$^{-1}$]，强冷空气入侵宁夏，寒潮爆发。宁夏地面气压南低北高，梯度加大，地面东风增强。冷空气从近地层灌入，宁夏上空的暖湿空气被强迫抬升，产生降雪。20 时，锋面和 500 hPa 槽线移出，过程趋于结束。

此次过程是在环流稳定少变的情况下，500 hPa 西风带小槽自河西走廊北侧快速东移，追上东南侧较大的槽后合并加强[15-19]；槽后冷空气与贝加尔湖南下冷空气配合侵入宁夏，并配合地面冷高压分裂南下使锋区南压，导致寒潮爆发和锋后降雪。本次过程属于高空小槽东移合并型，与 700 hPa 辐合线、高空急流、锋面及其次级环流的存在与发展密切相关。

西风带小槽的移速快、时空尺度小，地面冷高压突然分裂且快速南压，多股冷空气合并入侵，所以此次过程具有突发性与局地性强、持续时间短、强度大的特点。由于前期天气形势稳定，2 日 08 时关键转折突发，预报业务中获得实况资料的延迟性，再加上小槽在高度场的演变难以追踪且现有探空资料时空分辨率不足，因此对于此类突发灾害性天气，常规天气资料指示意义有限，准确预报具有难度。

3 IPV 分析

3.1 315 K 等熵面特征

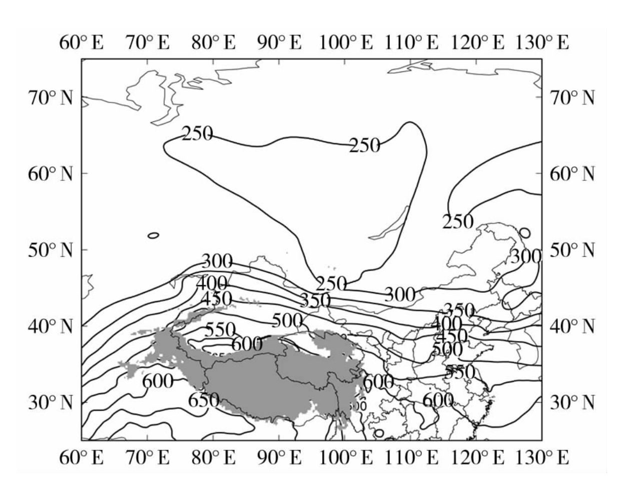
由(1)式可知，IPV 由等熵面上绝对涡度的垂直分量和静力稳定度共同决定。针对寒潮这种大尺度天气过程，涡度变化相对不大。因冷气团的静力稳定度较大，所以冷气团的 IPV 值较高，可利用 IPV 的守恒性来追踪寒潮过程中强冷空气的来源和传播[9-10]。

在 4 月 2 日 08 时 315 K 等熵面上(图 4)，35 °～45 °N 间从日本以东的洋面到咸海有一条弯曲的等压线密集带，它是热带气团和极地气团之间的过渡带，地面有锋面配合。

此次过程中，315 K 等熵面在低纬地区位于对流层中低层 600 hPa 以下，在中纬度地区位于对流层中高层 400 hPa 附近，而在极地区位于平流层低层 250 hPa 以上，其随纬度向北倾斜，坡度较大。由于 315 K 等熵面既可综合显示气团、锋区的位置，又可表征对流层、平流层的空气[11]，故选用 315 K 等熵位涡以分析本次寒潮过程中冷空气的源地和传播特征。

3.2 IPV 演变

对流层内位涡一般小于 1.5 PVU，平流层低层位涡很快大于 4 PVU，根据位涡的不连续分布及其守恒性，1.5～3.0 PVU 定义为“动力对流层顶”[9,20]，在 IPV 图上表现为一组密集的等值线[6]。



注：阴影区表示地形高度大于 3 000 m 的区域

图 4　2016 年 4 月 2 日 08 时 315 K 等熵面上气压分布

Fig. 4　Pressure on the isentropic surface of 315 K at 08:00 on 2 April 2016

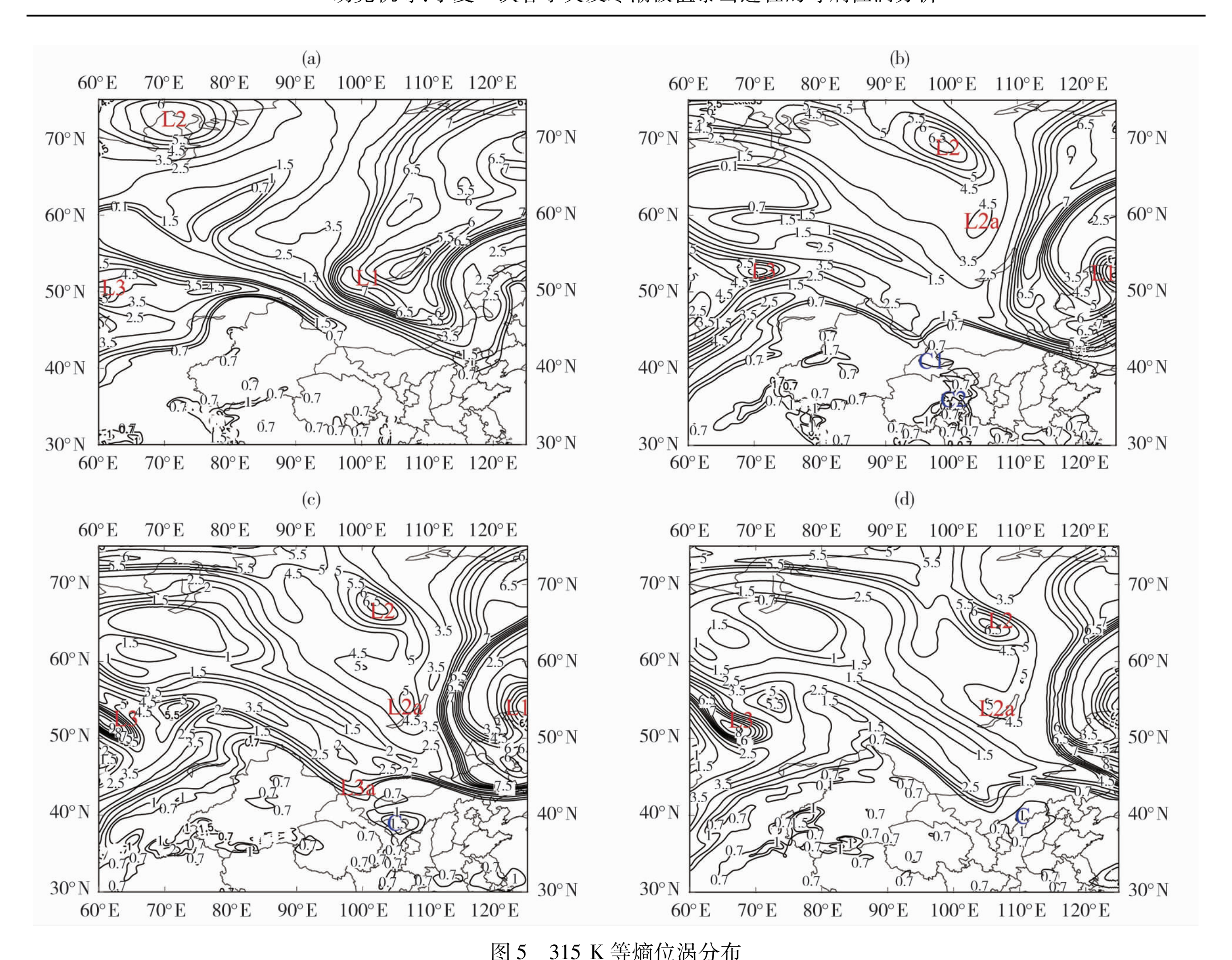


图 5 315 K 等熵位涡分布

Fig. 5 Distribution of potential vorticity on the isentropic surface of 315 K.

图 5 表明, 本次过程中动力对流层顶位于 45 ~ 50 °N, 北侧是平流层低层的高位涡空气, 南侧是对流层内的低位涡空气。

此次过程的强冷空气可追踪到 1 日 08 时(图 5a),平流层低层(250 hPa 附近)的高位涡主体 L1 位于贝加尔湖附近,中心值达 7.0 PVU,次高位涡中心 L2、L3 分别位于新地岛以东洋面上和咸海附近,之后 L1、L2 不断东移南扩,同时极区不断生成新的高位涡带,南下补充入 L1、L2。中纬度对流层内(500 hPa 附近)不断有大于 0.7 PVU 的位涡高值带沿西风带东移。此时宁夏为 IPV 低值区(0. 3 PVU),其上游青藏高原上有零散的冷空气活动。

2 日 08 时(图 5b,寒潮酝酿期),L1 到达我国东北且移出影响区域,L2 东移至西伯利亚地区并分裂出次高位涡中心 L2a 南下,强冷空气在贝加尔湖附近堆积,对应地面冷高压强度增强,北路冷空气已有向南爆发态势。L3 显著增强并不断形成位涡高值带东移,其前缘沿阿尔泰山抵达河西走廊西侧,且形成向东南方向扩散的态势,已占据西北路冷空气爆发的有利位置。在对流层内,青藏高原零散的冷空气系统聚合增强,形成高位涡中心 C1、C2 且东移至河西走廊,并与 L3 前缘位涡高值区相连。IPV 清晰表明,宁夏地区此时处于低位涡区,冷空气尚未入侵,但即将受到强冷空气 C1、C2 的合并入侵,从而产生一次明显的冷空气过程,对 14 时寒潮的爆发提供明确的预报指示。该时刻为寒潮爆发的关键期,各股冷空气均已处于有利的地理位置,一方面距宁夏很近,即将入侵发生天气过程,另一方面可相互配合,增强降温幅度。

2 日 14 时(图 5c,合并爆发期),对流层冷空气 C1、C2 合并形成高位涡中心 C,且增强至 1.5 PVU 并东移侵入宁夏北部。高位涡中心 C 所带来的降温幅度还取决于北路冷空气 L2a 和西北路冷空气 L3a 的配合。其中,L2a 增强且南压至贝加尔湖地区,并分裂高位涡值带南下,对应地面冷高压中心分裂且快速南压至宁夏北部,冷空气从北路入侵,完成

高纬度冷空气对此次过程降温幅度的加强。同时,L3a 已南压至宁夏西北侧 41 °N,对高原东侧冷空气 C 补充,使得西北路冷空气沿河西走廊入侵宁夏。在上述三路冷空气的配合下,寒潮爆发。

2 日 20 时(图 5d,东移消退期),高位涡中心 C 强度减弱且移出宁夏,过程趋于结束。

3.3 IPV 示踪冷空气源地与路径

以上分析表明,此次寒潮过程冷空气的来源和路径有 3 个:(1)咸海地区的对流层顶的冷空气 L3 沿西风带东移,在阿尔泰山附近与冷空气 C 配合,经河西走廊从西北路入侵宁夏。(2)70 °N 以北,60 °~80 °E 新地岛以东洋面的冷空气 L2 东移南扩后在贝加尔湖地区堆积,由平流层下部和对流层上部从北路加速南下。(3)青藏高原东移的对流层中层的冷空气聚合增强后形成 C,受到其北部 L2a 和西北部 L3a 的补充加强,由西路快速侵入宁夏从而造成寒潮过程。

3.4 槽脊对应的 IPV 特征分析

等熵位涡分布对应气流结构,可反映天气系统,高 IPV 对应着气旋性环流,低 IPV 对应着反气旋性环流[8]。因此,IPV 分布可表示寒潮过程中高空主要环流形势,通过追踪其异常区(高值或低值区)可追踪大气扰动的演变[6]。

结合等熵位涡图(图 5b)与前期环流形势(图 3a)分析可知,西西伯利亚地区至新疆北部的低 IPV 区对应高压脊区,高位涡主体 L1 对应强大的东北低涡及东亚大槽区域,L3 对应我国新疆西北部的低压槽区。

2 日 08 时(图 5b),对流层的 IPV 高值区 C1、C2 分别表示河西走廊北侧和东南侧的两个低槽(图 3a),且定量地描述了小槽的强度;2 日 14 时寒潮爆发时(图 5c),北侧小槽 C1 追上东南侧小槽 C2 后合并增强为 C,东移至宁夏,槽后强冷空气入侵;20 时(图 5d),小槽 C 移出宁夏,过程趋于结束。

以上分析表明:315K 等熵位涡不仅可以准确地表示大气环流形势,也可定量、清晰的追踪西风带小槽的合并发展与移动过程,避免人工判断槽的经验差异,比常规天气图具有更好的预报指示意义。

4 IPV 与灾害性天气的时空对应关系

4.1 IPV 时间演变关系分析

2 日 08 时,宁夏地区 IPV 仅为 0.3 PVU 左右

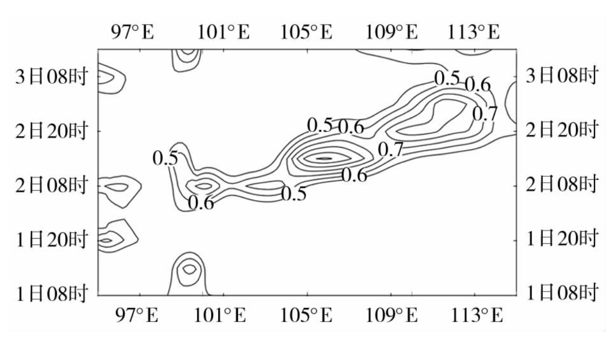


图 6 315 K 等熵位涡沿 38.48 °N 的经度 - 时间剖面图

Fig. 6 Longitude-time cross section of potential vorticity (unit: PVU) along 38.48 °N on the isentropic surface of 315 K

(图 6),仍为暖区控制,降温过程尚未开始。宁夏西侧 104 °E 等熵位涡数值已急剧增高到 0.7 PVU,代表较强冷空气已到达宁夏西侧,即将侵入宁夏,对应寒潮酝酿时刻,提前 6 h 指示宁夏寒潮过程的发生,预报效果良好。2 日 14 时,银川站(106.2 °E,38.48 °N)IPV 值显著增加至 1.2 PVU,对应寒潮爆发时刻。2 日 20 时,宁夏地区 IPV 值快速减小至 0.7 PVU 以下,IPV 高值区移至宁夏以东 110 °E,代表冷空气主体已经过境,预示寒潮趋于结束。

以上分析表明:IPV 高值区(>0.7 PVU)随时间的演变与寒潮酝酿、爆发、减弱、结束的时刻一致,可提前 6 h 指示短时局地寒潮的发生与结束,对此次突发性强、持续时间短(12 h)的寒潮过程响应较好。宁夏西侧或北侧的 IPV 大于 0.7 PVU 可初步作为宁夏地区发生冷空气活动的预报指标,未来可通过更多的个例统计,进一步精确起报阈值。

4.2 IPV 空间对应关系分析

2 日 14 时,宁夏中北部出现了一个中心值高达 1.5 PVU 的高位涡主体 C(图 7),IPV 数值大于 1.0 PVU 的区域与随后 6 h 降雪总量大于 1 mm 的区域

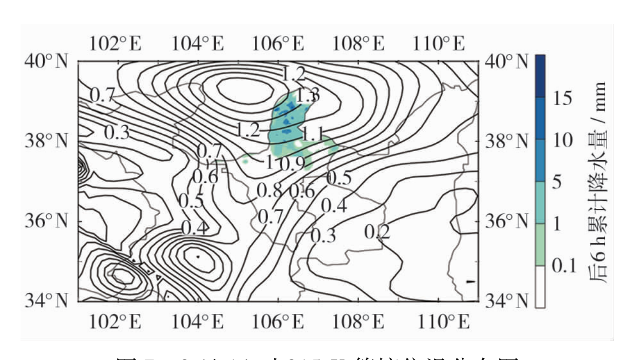


图 7 2 日 14 时 315 K 等熵位涡分布图

Fig. 7 Distribution of potential vorticity on the isentropic surface of 315 K at 14:00 on 2 April 2016

高度一致,在此区域内仅惠农和中宁县北部的个别地点未出现明显(>0.1 mm)降雪,IPV 异常大值区对降雪落区指示性较好。

对比宁夏 IPV 分布(图 7)与日降温分布(图 1a)可以发现,1.0 PVU 等值线与 8 ℃等降温线、0.8 PVU等值线与 6 ℃等降温线不仅在地理位置方面极为接近,曲率变化也较为吻合,即 IPV 大于 1.0 PVU 的区域与寒潮影响区一致,大于 0.8 PVU 的区域与强降温区一致,仅在宁夏东部的盐池县、同心县,等熵位涡所对应降温幅度低于实际降温 2 ℃左右。

上述分析表明:315 K 等熵位涡异常大值区与此类寒潮降雪影响区的空间对应较好,对预报降温降雪区域及其降温幅度均具有较好地指示意义,可作为精细定量预报的重要指标。

5 结 论

针对宁夏一次突发性、局地性与灾害性强、持续时间较短的春季寒潮暴雪过程,利用等熵位涡,对其影响系统、爆发机制、冷空气来源、预报指标等方面进行了诊断分析。结果表明:

(1) 此次过程属于高空小槽东移合并型,槽后冷空气与贝加尔湖南下冷空气配合侵入宁夏,并配合地面冷高压快速分裂南下且锋区南压,导致强冷空气爆发和锋后降雪。南支槽前偏南暖湿气流和 850 hPa 河套回流为暴雪的产生提供了充沛的水汽条件。

(2) 等熵位涡异常大值可表示强冷空气,利用等熵位涡异常大值的演变可有效追踪强冷空气的来源和路径,并说明寒潮过程的关键预报线索。IPV 分析表明,此次冷空气来源和路径有三个:一经河西走廊从西北路推进;二是 70 °N 以北,60 °~80 °E 新地岛以东洋面的冷空气东移南扩后在贝加尔湖地区堆积,由平流层下部和对流层上部从北路南下;三是青藏高原东移的对流层中层冷空气聚合增强后,受到前两者的补充由西路侵入宁夏。

(3) IPV 分布可定量、清晰地表示寒潮过程中高空主要环流形势,特别是对于此次寒潮过程的关键影响系统西风带小槽,其在等熵位涡场中所对应的高 IPV 表现十分清晰,移动和发展均可定量追踪,避免了人工判定槽时所产生的个体经验差异,具有更好的预报指示意义。

(4) 315 K 等熵位涡异常大值随时间演变与寒潮酝酿、爆发、减弱、结束的时刻一致,且数值大于 1.0 PVU 的区域与寒潮和降雪落区一致,大于 0.8 PVU 的区域与强降温区一致,可作为精细定量预报的重要指标。

(5) 过程前期环流形势稳定、天气系统运行平缓,后期形势突变、多系统相互配合,常规气象资料指示意义有限,预报难度大。但是,315 K 等熵位涡图对此类短时、局地性强的春季寒潮降雪过程指示性很好,其不仅可以清楚地示踪冷空气的来源和传播路径,定量、清晰地表示大气弱扰动的演变,而且 IPV 异常高值还可提前 6 h 指示寒潮的爆发与减弱结束,同时明确地指示气象灾害的影响区域。

参考文献(References)

[1] HOSKINS B J,MCINTYRE M E,ROBERTSON A W,et al. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,1985,111(470):877 -946.

[2] 寿绍文. 位涡理论及其应用[J]. 气象,2010,36(3):9 -18. [SHOU Shaowen. Theory and application of potential vorticity[J]. Meteorological Monthly,2010,36(3):9 -18.]

[3] 赵其庚. 侵入青藏高原冷空气过程的等熵位涡分析[J]. 气象,1990,16(6):9 -14. [ZHAO Qigeng. An analysis with isentropic potential vorticity on a cold wave entering the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Meteorological Monthly,1990,16(6):9 -14.]

[4] 丁一汇,马晓青. 2004/2005 年冬季强寒潮事件的等熵位涡分析[J]. 气象学报,2007,65(5):695 -707. [DING Yihui, MA Xiaoqing. Analysis of isentropic potential vorticity for a strong cold wave in 2004/2005 winter[J]. Acta Meteorologica Sinica,2007,65(5):695 -707.]

[5] 黎惠金,李江南,肖辉,等. 2008 年初中国南方低温雨雪冰冻事件的等熵位涡分析[J]. 高原气象,2010,29(5):1196 -1207. [LI Huijin,LI Jiangnan,XIAO Hui,et al. Isentropic potential vorticity analysis on the events of low temperature freezing rain and snow in southern China in early 2008[J]. Plateau Meteorology,2010,29(5):1196 -1207.]

[6] 陶祖钰,郑永光. 位温、等熵位涡与锋和对流层顶的分析方法[J]. 气象,2012,38(1):17 -27. [TAO Zuyu,ZHENG Yongguang. Analysis methods on potential temperature,isentropic potential vorticity, front and tropopause[J]. Meteorological Monthly,2012,38(1):17 -27.]

[7] 吴志彦,李宏江,赵海军,等. 等熵位涡揭示的一次强寒潮过程中高层扰动特征[J]. 海洋气象学报,2017,37(1):84 -91. [WU Zhiyan,LI Hongjiang,ZHAO Haijun,et al. Disturbance features of mid-upper troposphere during a strong cold wave event re-

vealed by isentropic potential vorticity analysis[J]. Journal of Marine Meteorology,2017,37(1):84－91.]
[8] 谭志强,桑建人,纪晓玲,等. 宁夏一次大风扬沙天气过程机制分析[J]. 干旱区地理,2017,40(6):1134－1142.[TAN Zhiqiang,SANG Jianren,JI Xiaoling,et al. Mechanism of a strong wind and blowing sand process in Ningxia[J]. Arid Land Geography,2017,40(6):1134－1142.]
[9] 杨金虎,靳荣,刘晓云,等. 西北地区东部汛期降水季节内分布特征分析[J]. 干旱区地理,2017,40(5):942－950.[YANG Jinhu,JIN Rong,LIU Xiaoyun,et al. Inter-seasonal distribution pattern of rainy season precipitation in the east region of northwest China[J]. Arid Land Geography,2017,40(5):942－950.]
[10] 陈豫英,陈楠,王式功,等. 近55年宁夏秋季降水的时空变化特征及其大尺度环流背景[J]. 干旱区地理,2009,32(1):9－16.[CHEN Yuying,CHEN Nan,WANG Shigong,et al. Spatial-temporal variation of autumn rainfall in the last 50 years in Ningxia and its backgrounds on the large scale circulation[J]. Arid Land Geography,2009,32(1):9－16.]
[11] 胡文东,纪晓玲,李艳春,等. "20010408"宁夏强沙尘暴天气中尺度系统分析[J]. 南京气象学院学报,2004,27(6):791－799.[HU Wendong,JI Xiaoling,LI Yanchun,et al. Mesoscale system analysis on a severe sand storm in Ningxia[J]. Journal of Nanjing Meteorology Institute,2004,27(6):791－799.]
[12] 万瑜,曹兴,窦新英,等. 中天山北坡春季寒潮型暴雪致灾成因分析[J]. 干旱区地理,2015,38(3):478－486.[WAN Yu,CAO Xing,DOU Xinying,et al. Disaster-causes of a cold wave snowstorm in the north slope of middle Tianshan Mountains[J]. Arid Land Geography,2015,38(3):478－486.
[13] WU M R,SNYDER B J,MO R,et al. Classification and conceptual models for heavy snowfall events over east Vancouver Island of British Columbia,Canada[J]. Weather & Forecasting,2013,28(5):1219－1240.
[14] 冯建民,胡文东,陈楠,等. 宁夏短期天气预报指导手册[M]. 北京:气象出版社,2012:134－151.[FENG Jianmin,HU Wendong,CHEN Nan,et al. The weather forecast manual of Ningxia[M]. Beijing:China Meteorological Press,2012:134－151.]
[15] SONG L,WU R G. Processes for occurrence of strong cold events over eastern China[J]. Journal of Climate,2017,30(22):9247－9266.
[16] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 天气学原理和方法[M]. 北京:气象出版社,2007:266－320.[ZHU Qiangen,LIN Jinrui,SHOU Shaowen,et al. Synoptic theory and method[M]. Beijing:China Meteorological Press,2007:266－320.]
[17] GROTJAHN R,ZHANG R. Synoptic analysis of cold air outbreaks over the California central valley[J]. Journal of Climate,2017,30(23):9417－9433.
[18] MULLENS E D,LESLIE L M,LAMB P J,et al. Synoptic pattern analysis and climatology of ice and snowstorms in the Southern Great Plains,1993—2011[J]. Weather and Forecasting,2016,31(4):1109－1136.
[19] CASOLA J H,WALLACE J M. Identifying weather regimes in the wintertime 500 hPa geopotential height field for the Pacific-North American sector using a limited-contour clustering technique[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology,2007,46(10):1619－1630.
[20] JEONG J H,KIM B M,HO C H,et al. Stratospheric origin of cold surge occurrence in east Asia[J]. Geophysical Research Letters,2006,33(14):L14710.

Isentropic potential vorticity for a sudden cold wave and extreme snowstorm process in spring 2016 in Ningxia

HU Liang-fan[1], HU Wen-dong[1,2,3], GU Si-yu[1], WANG Lei[1,4], WANG Jin-lan[5]

(1 *School of Atmospheric Science*, *Chengdu University of Information Technology*, *Chengdu* 610225, *Sichuan*, *China*;
2 *Sichuan provincial key laboratory of software auto-developing and intelligent service*, *Chengdu* 610225, *Sichuan*, *China*;
3 *Sichuan provincial key laboratory of plateau atmosphere and environment*, *Chengdu* 610225, *Sichuan*, *China*;
4 *Meteorology service center of Heilongjiang province*, *Harbin* 150030, *Heilongjiang*, *China*;
5 *Xinxiang meteorological Bureau of Henan province*, *Xinxiang* 453000, *Henan*, *China*.)

Abstract: Using the conventional meteorological observation data, the hourly observation data from the automatic meteorological station and the ECWMF 6-hourly reanalysis data with the resolution of 0.125°×0.125°, based on comprehensive diagnosis analysis methods, a short lifespan process of a cold wave and record-breaking snowstorm in Ningxia Province, China from April 2nd to April 3rd, 2016 was investigated in terms of tempo-spatial distribution characteristics of disasters, atmospheric circulation change, weather systems evolution, the sources and paths of cold

airs, outbreak mechanism of cold wave and forecast indicators by using potential vorticity on the isentropic surface of 315 K. The results indicate that under the stable circulation background, the small trough of westerly belt on 500 hPa was moved eastward from the north side of the Gansu Corridor, catching up with the larger trough on the southeast side and then merged and reinforced. The northwesterly strong cold air behind the trough invaded Ningxia along with the cold air from the south of Lake Baikal. The surface cold anticyclone was split and moved southward rapidly with cold front, leading to the outbreak of cold wave and heavy snowstorm behind the cold front. This process was classified as the type of upper air small trough moving eastward and merging, which was characterized by the suddenness, locality, short duration (about 12 hours) and strong disasters. It is difficult to predict accurately by using conventional observation data because of the delay of observational data obtained in forecasting, the difficulty in tracing the evolution of the trough in the height fields and the inadequate tempo-spatial resolution of existing air sounding data. However, The isentropic potential vorticity (*IPV*) can clearly trace the source and path of cold air. The analysis of *IPV* indicated that, the cold air on top of the troposphere from Aral Sea was moved southeasterly, then merged with the cold air in the mesosphere of the troposphere in Qinghai-Tibet Plateau and thus enhanced. The cold air in the bottom of the stratosphere from east of Novaya Zemlya was moved eastward slowly, then turned southward from Lake Baikal at a higher speed and supplementing the direct cold air mentioned above, and the interaction of the two caused the cold wave in Ningxia. The *IPV* also represented the upper atmospheric circulation during the cold wave. The areas of great abnormal values of *IPV* indicated the evolution of small trough quantitatively and clearly which had better forecast significance than the conventional meteorological data. The temporal evolution of *IPV* coincided with the stages of cold wave's initiation, break-out, recession and ending, and the cold air activity can be predicted 6 hours ahead. From the space perspective, the zones of the cold wave and the snowfall shared the identical distribution with the areas with values above 1.0 PVU, and the zones having severe temperature drop were those with the value being larger than 0.8 PVU. This study indicated that the 315 K isentropic potential vorticity can be used as an effective tool for analyzing and predicting the sudden cold wave and extreme snowstorm process in spring, and also as a key forecast indicator for fine quantitative forecast in Ningxia. More researches on the catastrophic weather events should be conducted in order to predict the threshold of *IPV* more accurately.

Key words: Ningxia; cold wave and heavy snow; isentropic potential vorticity; mechanism analysis; forecast indicator